



Coronary CT Angiography-Based Assessment of Coronary in-Stent Restenosis: A Journey through Past and Present Trends

관상동맥 CT 조영술을 활용한 스텐트 재협착 평가:
과거와 현재 최신 동향으로의 여정

Yoon Seong Lee, MD^{1,2}, Eun-Ah Park, MD^{1,2}, Whal Lee, MD^{1,2*}

¹Department of Radiology, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea

²Department of Radiology, Seoul National University, College of Medicine, Seoul, Korea

Treatment of patients with coronary artery disease commonly involves the use of balloon-expandable stent placements, currently recognized as the most prevalent approach for coronary artery revascularization. Nevertheless, the occurrence of restenosis remains a significant complication following percutaneous coronary interventions. The diagnostic role of coronary CT angiography (CCTA) in detecting stent restenosis has limitations primarily attributable to challenges in accurately discerning the lumen, due to issues such as blooming and motion artifacts. As a result, many cases often necessitate a transition to conventional coronary angiography. However, recent advancements in CT technology have led to notable improvements in both sensitivity and specificity, underscoring the growing significance of CCTA as a diagnostic tool. The consistent reporting of high negative predictive value is particularly noteworthy. This review aims to explore the historical context, current status, and recent trends in diagnosing coronary artery stent restenosis using CCTA.

Index terms Computed Tomography Angiography; Percutaneous Coronary Intervention; Coronary Restenosis

서론

관상동맥병(coronary artery disease; 이하 CAD) 환자의 치료에 1980년대 처음 도입된 풍선팽창스텐트(balloon-expandable stent) 치료는 급성 합병증을 예방하고 임상결과를

Received February 16, 2024
Accepted March 8, 2024

***Corresponding author**

Whal Lee, MD
Department of Radiology,
Seoul National University Hospital,
101 Daehak-ro, Jongno-gu,
Seoul 03080, Korea.

Tel 82-2-2072-0141
Fax 82-2-743-6385
E-mail whal.lee@gmail.com

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

개선하는데 성공하여 획기적인 변혁을 가져온 치료 방법이다(1-3). 풍선팽창스텐트 치료는 빠르게 풍선혈관성형술(balloon coronary angioplasty)을 대체하였고 현재 가장 흔히 시행되는 관상동맥재개통(coronary revascularization) 치료법이다. 그러나 경피적 관상동맥 중재술(percutaneous coronary intervention) 이후 재협착(in-stent restenosis; 이하 ISR)은 여전히 주요 합병증으로 남아 있으며, 약 5%–30%의 환자들에게 발생한다(2, 4, 5). 스텐트 내 혈전증과 달리 ISR은 증상을 동반하지 않는 경우가 많으나(6), ISR의 약 6%에서는 재시술까지 필요하기 때문에 빠른 진단이 매우 중요하다(4, 7). 2019년 유럽심장학회 가이드라인은 관상동맥 CT 조영술(coronary CT angiography; 이하 CCTA)을 CAD를 진단하는 주요 비침습적 검사로 권고하였다(Class I) (8). 그러나 CCTA로 스텐트 내강을 관찰하는 것이 항상 성공적이지는 않으며, ISR 진단 정확도를 높이기 위한 노력은 지속되어 왔다. 본 종설에서는 CCTA를 이용한 관상동맥 스텐트 ISR 진단의 과거와 현재, 그리고 최신 동향에 대해 알아보하고자 한다.

관상동맥 스텐트 CCTA 촬영의 장벽들

관상동맥 스텐트의 내강을 CCTA를 통해 성공적으로 관찰하는 데는 여러 가지 요인들이 영향을 미치며, 대표적으로 번짐허상(blooming artifact), 움직임허상(motion artifact), 혈관 조영증강 정도, 심장의 입체 구조 등이 있다.

Blooming Artifact

번짐허상(blooming artifact)은 스텐트 구조물이 실제보다 두꺼워 보이게 만들어 스텐트 내강을 실제보다 좁아 보이게 만든다. 번짐허상은 부분용적효과(partial volume averaging effect)와 선속강화 현상(beam hardening)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 중 선속강화현상은 과거에는 번짐허상의 주된 원인으로 알려져 있었으나 현재는 그 영향에 대해서는 다소 논란이 있다(9). 고식적 CT에서 사용되는 X-ray는 다색(polychromatic) 방사선이기 때문에 다양한 에너지의 X-ray로 구성된 불균질선속이다. 고감쇠 물질을 촬영하면 이 중 저-에너지 광자(lower energy photon)는 상당 부분 흡수가 되고 고-에너지 X-ray beam으로의 이동이 일어난다. 이것을 선속강화현상(beam-hardening)이라 부르고 스텐트, 고농도의 조영제, 칼슘과 같은 고감쇠 물질 주변으로 번짐허상을 일으키는 것으로 여겨진다.

스텐트를 삽입하는 병변에 석회화가 심한 경우, 스텐트를 겹쳐서 삽입하는 경우(overlapping), Y, V, T- 등 분기(bifurcation)에 삽입된 경우, 크러쉬 기술(crush technique)이 사용된 경우에는 번짐허상이 증가하는 요인이 된다(10). 번짐허상을 최소화하기 위해서는 스텐트의 스트럿(strut)의 두께가 얇고 스텐트 표면에 비해 금속의 비가 낮을수록 유리하다. 대부분의 금속 노출 스텐트(bare metal stents)는 일반적으로 스테인리스 스틸로 만들어지지만, 신세대 약물 방출 스텐트(drug-eluting stents)는 코발트-크롬 합금(CoCr) 또는 플래티넘-크롬 합금(PtCr) 금속 플랫폼으로 구성되어 있다. 이러한 개선으로 인해 스트럿의 두께가 130–140 μm 에서 60–80 μm 로 줄어들었다. 얇거나 두꺼운 스텐트 스트럿의 기준은 정해진 것은 없고 문헌에 따라 다양한 기준이 사용되

는데(11, 12), 스텐트 스트럿의 두께가 100–140 μm 이상일 때 CCTA 스텐트 영상의 질 저하와 연관되는 것으로 보고되었다(13, 14). 스텐트의 재질도 영향을 미친다. 마그네슘이나 코발트-크롬 합금으로 제작된 스텐트가 스테인리스 스틸로 제작된 스텐트보다 CCTA 촬영에 더 유리하다(15). 선속강화현상을 줄이는 다른 전략은 광자량 부족 허상(photon starvation artifact)을 피하기 위해 높은 관전압(kVp)으로 CT를 촬영하는 것이다. 그러나 이것은 방사선 노출을 증가시키므로 권장되는 방법은 아니다.

부분용적효과 또한 번짐허상의 원인인데, 이는 CT 값이 특정 화적소(voxel) 내부의 평균 감쇠를 나타내기 때문에 불가피하게 나타나는 것이다. 부분용적효과를 줄이기 위해서는 화적소(voxel)를 작게 하기 위해 얇은 단면재구성 영상과 작은 시야(field of view)를 사용하는 것이 좋다.

Motion Artifact

환자의 호흡이나 심장 박동에 의한 움직임 허상은 극복해야 할 과제이다. CT 촬영 시간이 빨라지면서 더 이상 환자의 호흡이 문제가 되는 경우는 드물다. 그러나 환자가 호흡을 참더라도 심장은 끊임없이 움직이는 장기이기 때문에 CCTA를 촬영할 때 적절한 심박수 조절은 필수적이었다. 움직임 허상은 영상을 흐리게 할 뿐 아니라 스텐트와 같은 고감쇠물질이 있을 때 번짐허상을 보다 과장시킨다. 심박수가 증가할수록 스텐트 내강의 영상의 질이 나빠지는 것은 잘 알려져 있다(16). Groen 등(17)은 64 multidetector CT에서 심박수를 낮추는 것이 CT 장비의 시간해상력을 높이는 것보다 더 효과적이라고 보고하기도 하였다. 심박수를 어느 수준으로 낮게 유지할 것인지는 사용하는 CT 장비의 시간해상력에 따라 다르지만, 분당 65회 미만의 심박수가 널리 받아들여지는 권장 심박수이다.

Intravascular Contrast Enhancement

충분한 관상동맥의 조영증강 또한 성공적인 스텐트 내부 관찰을 위한 필요 요건이다. 일반적인 관상동맥의 관찰을 위해서는 250–300 Hounsfield unit (이하 HU) 사이의 조영증강이 요구된다(18–20). 그러나 스텐트가 있는 경우 선속강화현상이나 샤프 컨볼루션 커널(sharp convolution kernel) 사용으로 인한 영상 잡음 증가가 신호 대 잡음비(signal to noise ratio; 이하 SNR) 및 대조도 대 잡음비(contrast to noise ratio; 이하 CNR)를 저해시키기 때문에 보다 높은 조영증강을 요구할 수 있다(21).

Cardiac Anatomy

여러 팬텀 연구를 통해서 스캔 축에 대해 스텐트가 기울어진 것이 내강 관찰에 악영향을 끼치는 것이 잘 알려져 있다(22, 23). 내강은 CT 스캔의 z축에 평행하거나(0°) 수직일 때(90°) 가장 잘 보인다. 그러나 우관상동맥의 중간 분절을 제외하면 관상동맥은 대개 스캔 z축에 대해 기울어져 있기 마련이다. 따라서 심장의 입체적인 구조 또한 스텐트 내강 관찰을 어렵게 만드는 요인이다.

크기가 작은 관상동맥 분지에 스텐트가 삽입된 경우 작은 직경 자체도 내강 관찰을 어렵게 만드는 요인이 된다. 여러 연구에서 스텐트 직경이 3 mm 미만인 경우 CCTA로 개통성을 평가하지 못하는 경우가 3 mm 이상인 경우에 비해 크게 증가하였다(10, 24–26).

스텐트 촬영의 과거

1995년 조영증강을 하지 않은 electron beam CT를 이용해 관상동맥 스텐트의 위치를 특정한 연구가 최초로 발표되었다(27). 이후 몇 개의 연구가 조영증강 CT를 이용해 스텐트의 개통성을 평가하고자 하였으나 당시 CT 기술로는 스텐트의 내부를 직접 관찰하는 것이 불가능했다. 따라서 스텐트 개통성(patency)을 확인하기 위해 스텐트 직하방의 관상동맥 조영증강을 관찰하여 간접적으로 이를 확인하고자 하였다. 그러나 이것은 ISR을 수치화할 수 없고, 결순환(collateral circulation)에 의해 역행성으로 조영제가 차는 것을 구분할 수 없기에 스텐트가 막혔을 때도 거짓양성을 나타낼 수 있다는 단점이 있었다.

이후 16채널 CT가 등장하면서 어느 정도 스텐트 내강을 관찰할 수 있게 되면서 다른 방법이 모색되었다. 그중 하나는 픽셀 셈 기법(pixel count method)이다. 이는 스텐트 근위부에서 측정된 가장 낮은 CT 값을 기준으로 삼아, 스텐트 내강의 모든 픽셀 중 기준치보다 높은 것들의 비율을 구해 50%를 넘지 않으면 유의미한 ISR이 있는 것으로 판단하는 것이다(28). 당시 보고된 민감도와 특이도는 각각 75%, 88%이었으나 작업이 번거로운 탓에 일상적 임상진료에 도입되지 못했다. 다른 방법은 스텐트 근위부에서 구한 기준값과 스텐트 내강의 최소 CT 값 차이를 구해 75 HU보다 큰 경우 적어도 50%의 ISR이 있다고 판단하는 것인데 방법이 매우 직관적이고 간단한 것이 장점이다(29). 현재도 스텐트 내부의 CT 값을 직접 비교하는 것은 일상 판독 때 흔히 행해지고 있으나 선속강화현상에 의해 스텐트 내강의 CT 값이 60-100 HU 정도 높게 나타나는 것을 주의해야 한다.

스텐트 촬영 기법의 현재

현재 실제 임상 촬영 환경에는 64, 128, 192 이중선원(dual source) CT, 64, 128-, 256-, 320 다중채널 CT 등이 혼재한다. 최근 연구들을 살펴보면 CT 장비의 발달로 장비의 종류와 상관없이

Table 1. Summary of Recent Studies Assessing Coronary Stent Patency and Detecting Significant in-Stent Restenosis

Author/Year	Scanner	Patients (n)	Stents (n)	Not Assessable (%)	Sensitivity (%)	Specificity (%)	PPV (%)	NPV (%)
Pugliese et al., 2008 (10)	64 DSCT	100	178	5	94	92	77	98
Oncel et al., 2008 (26)	64 DSCT	35	48	0	100	94	89	100
Pflederer et al., 2009 (11)	64 DSCT	112	150	10	84	95	73	97
de Graaf et al., 2010 (51)	320 MDCT	53	89	8	92	91	65	98
Veselka et al., 2011 (52)	64 DSCT	34	34	0	100	74	27	100
Zhang et al., 2012 (53)	64 DSCT	50	115	0	69	91	50	96
Yoshimura et al., 2015 (54)	64 DSCT	45	79	0	82	93	64	97
Tatsugami et al., 2018 (55)	320 MDCT	16	22	0	100	94	83	100
Li et al., 2018 (56)	192 DSCT	69	140	0	100	92	82	100
Li et al., 2021 (57)	320 MDCT	40	85	8	100	97	50	96
Kawai et al., 2024 (45)	320 MDCT	85	166	4	86*	90*	50	98
Pooled		554	940	4	93	92	72	97

*Mean of two observers.

DSCT = dual source CT, MDCT = multidetector CT, NPV = negative predictive value, PPV = positive predictive value

ISR 진단의 민감도와 특이도 모두 높은 수치를 보이고 있다(Table 1). 특히 음성예측도가 일관되게 높게 보고되고 있다. 따라서 CCTA는 관상동맥 스텐트를 삽입한 환자의 침습적인 관상동맥 조영술의 필요성을 결정하는 단계에서 ISR를 배제하는 중요한 수문장 역할을 할 것으로 기대한다. 다만 영상의 품질이 좋지 않아 평가 불가능한 경우가 여전히 남아 있어 아직 극복해야 할 과제이다. 현재 스텐트 내강을 살펴보기 위해 CCTA에서 주로 사용되는 기술을 크게 살펴보면 다음과 같다.

Sharp Convolution Kernel

샤프 컨볼루션 커널(convolution kernel)은 스텐트 스트럿(strut) 같은 고감쇠 구조물의 에지 향상(edge enhancement)을 위해 디자인된 영상 재구성 기법이다. CAD의 죽상경화판(atherosclerotic plaque)의 평가에는 소프트 컨볼루션 커널이 우월하지만 스텐트 내부의 평가에는 번짐허상이 더 적은 샤프 컨볼루션 커널이 선호되는데 대신 영상의 잡음이 증가하는 것이 단점이다(30).

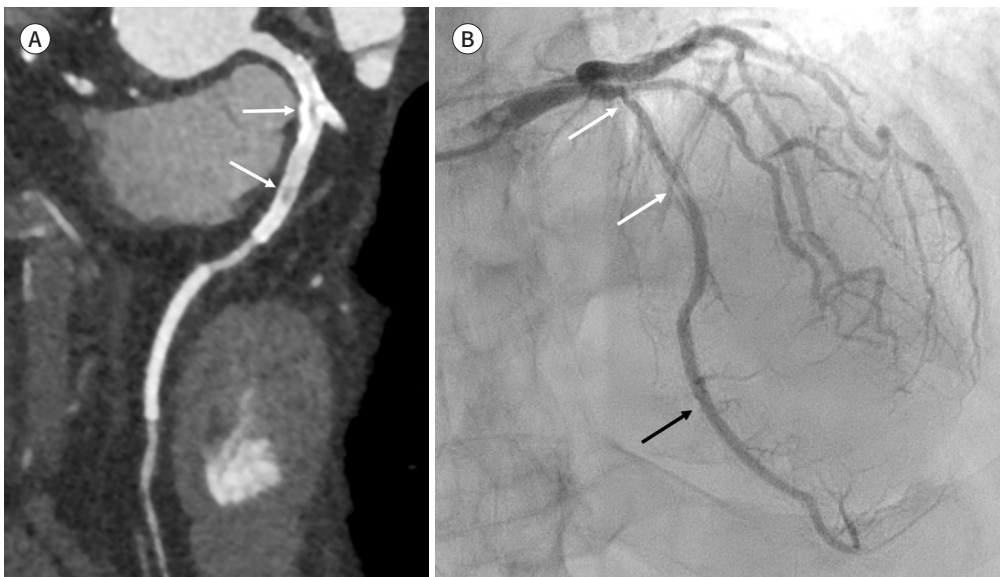
Dual Source CT

2000년대 중반 64채널 이중선원 CT가 등장하면서 두 개의 튜브가 동시에 회전하며 데이터를 얻기 때문에 시간분해능(temporal resolution)을 획기적으로 줄여, 현재 3세대 192채널 이중선원 CT의 경우 66 ms까지 개선되었고 절편 두께 또한 1.25 mm에서 0.4 mm까지 가능해졌다(Fig. 1). 더 빠른 시간분해능은 더 적은 운동허상(motion artifact)을 의미하기 때문에 이중선원 CT의 등장으로 이전에 요구되던 엄격한 심박수 조절이 다소 완화될 여지가 생겼다. Pugliese 등(10)은 이중선원 CT로 심박수 조절 없이 촬영했을 때 심박수가 70회 이상인 그룹과 미만인 그룹에서 진단

Fig. 1. Representative case of significant in-stent restenosis detected by 192-channel dual source CT.

A. In the curved multiplanar view acquired from 192-channel dual source CT, over 50% in-stent restenosis is observed in the proximal segment of the left anterior descending artery (arrows). The stent inserted in a more distal segment appears patent.

B. Invasive coronary angiography confirms significant in-stent restenosis at the proximal left anterior descending artery stent (white arrows) and patency of the more distal stent (black arrow).



능력에 차이가 없음을 보고하였다. Oncel 등(26)은 64채널 이중선원 CT를 이용해 35명의 환자에게 심박수 조절이 없어도 CCTA를 촬영했을 때 48개의 스텐트 중 85%가 ISR를 평가하기에 충분한 영상 질을 보인다고 보고하였다.

반복재구성(Iterative Reconstruction)

전통적으로 CT 이미지 재구성의 표준 방법은 필터보정 역투영법(filtered back projection; 이하 FBP)이었다. FBP는 계산이 효율적이지만, 필터링 단계에서 노이즈가 증가하는 단점이 있다. 최근에는 반복재구성(iterative reconstruction; 이하 IR)이 CCTA의 기본 이미지 재구성 방법으로 대체되고 있다. IR은 FBP와 비교해 영상의 잡음이 적어 공간해상력에 영향을 주지 않으면서도 다양한 영상 인공물을 줄일 수 있다(31-34). 109명의 환자에게 삽입된 159개의 스텐트를 대상으로 한 연구에서 sinogram-affirmed IR (이하 SAFIRE)은 3 mm 이상의 스텐트에서는 유의한 차이를 보이지 못했지만, 3 mm 이하의 작은 직경을 가진 스텐트에서 FBP와 비교해 더 높은 민감도(SAFIRE 82% vs. FBP 62%)와 특이도(SAFIRE 66% vs. FBP 50%), 양성예측도(SAFIRE 66% vs. FBP 50%), 그리고 곡선하면적(area under the curve, SAFIRE 0.81 vs. FBP 0.70)을 보여주었다(35).

이중 에너지 CT (Dual Energy CT) 가상 단일 에너지 영상(Virtual Monoenergetic Image)

Virtual monoenergetic image (이하 VMI)는 이중 에너지 CT (dual energy CT) 영상을 토대로 고식적 CT의 single-energy 영상과 유사하게 재구성해 내는 기술이다. 이때 어떤 에너지 레벨로 재구성하는지에 따라 영상의 특성이 다소 달라지는데, 저-에너지 VMI (< 70 keV)는 요오드 k-edge와 근접하기 때문에 더 높은 조영증강을 얻을 수 있다. 한편, 고-에너지 VMI는 선속강화현상을 줄이는 데 유용하다(36). 어떤 에너지 레벨의 VMI를 선택하는 것이 스텐트 내부 평가에 가장 적합한지 40-140 keV까지 비교한 연구에서 에너지 레벨이 높을수록 SNR과 CNR은 감소하였다. 또한 선속강화현상에 의한 인공적인 스텐트 내부의 CT 값 증가를 비교하기 위해 스텐트 내부와 외부의 CT 값의 차이를 살펴보자 고-에너지 VMI일수록 그 차이가 감소하긴 하나 80 keV부터 편평기(plateau)를 보였다. 결과적으로 주관적인 스텐트 내부의 영상 질 평가에서 80 keV가 가장 적합한 것으로 보고되었다(37).

최신 기술의 동향

기능적 분석을 통한 간접적인 스텐트 ISR 확인의 가능성

지금까지 기술한 CCTA의 형태학적인 평가와 더불어 CT의 기능적인 분석 기법이 스텐트 ISR 진단의 양성예측도를 높이기 위해 보완적인 역할을 할 가능성이 기대된다. CT 기반 분획혈류예비력(CT-fractional flow reserve; 이하 CT-FFR) 측정 기법은 전산유체역학을 이용하여 CCTA 영상에서 FFR을 계산한다. $FFR \leq 0.8$ 인 경우 심근허혈이 있는 CAD의 진단 정확도가 90% 이상으로 알려져 있다. 그러나 CT-FFR은 주로 안정형 CAD에서 주로 연구되었으며 스텐트가 있는 환자는 현

재 가이드라인에서 권고하는 분석 대상이 아니다(38). 그럼에도 몇몇 임상 케이스에서 CCTA가 놓친 관상동맥 스텐트 ISR을 CT-FFR이 진단할 수 있는 잠재적인 유용성을 보고한 바 있으며 추가적인 검증이 필요하다(39). 역시 기능적인 분석의 일종인 심근관류 CT 또한 CCTA 단독으로 ISR를 판정했을 때보다 정확도를 개선할 수 있었으며(40), 전층(transmural) 관류저하보다 심내막밑(subendocardial) 관류저하가 ISR를 진단하는데 정확도가 높았다(41). 그러나 동적 심근관류 CT는 검사의 번거로움을 고려할 때 제한적인 환자군에서 적용 가능할 것으로 예상된다.

AI를 이용한 재구성

딥러닝을 이용한 영상재구성 기법은 영상의학 전반에 걸쳐서 활발하게 연구되고 있으며, 심장 영상도 예외가 아니다. Tatsugami 등(42)은 합성곱 신경망(convolutional neural network; 이하 CNR)을 이용한 딥러닝 기반의 알고리즘이 영상의 잡음은 감소시키고 CNR을 개선할 수 있음을 보여주었다. 이후 잡음 개선뿐만 아니라 공간해상력을 개선하기 위한 타개책으로 초해상도-딥러닝재구성(super-resolution deep learning reconstruction; 이하 SR-DLR)이 제안되었다(43). SL-DLR은 0.25 mm 슬라이스 두께의 초고해상도 CT (ultra-high-resolution CT) 영상을 기반으로 트레이닝 된 3D 신경망을 표준 해상도의 CT 영상에 적용하여 영상 잡음 개선과 공간해상력 증가를 함께 얻을 수 있었다(Fig. 2). 현재 이 기술은 Precise IQ Engine, Canon Medical Systems (PIQE)이라는 이름으로 상용화되어 있어 특정 회사의 제품에만 사용할 수 있다. 실제 환자군을 대상으로 한 연구에서 SL-DLR은 IR과 비교해 우수한 영상의 질과 정확성을 보여줄 수 있었는데, 특

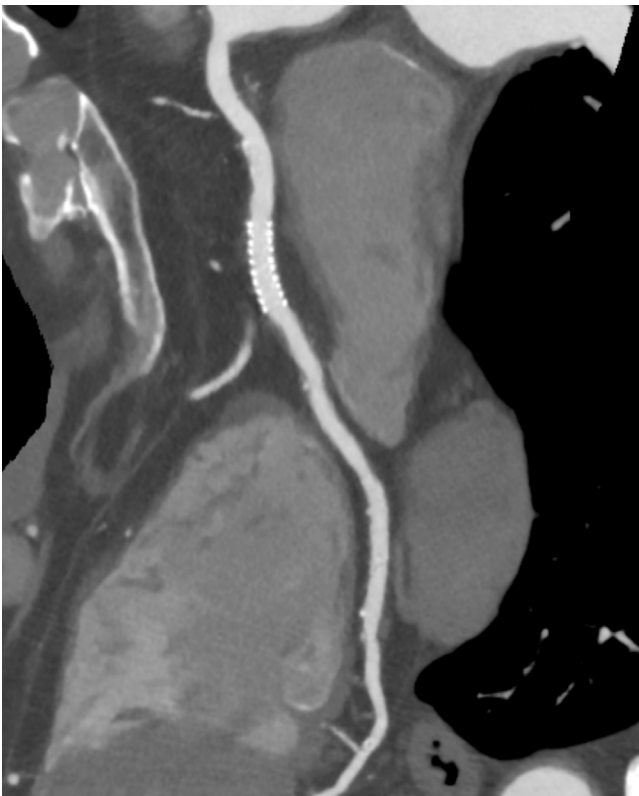


Fig. 2. Visualizing coronary stent images with super-resolution deep learning reconstruction.

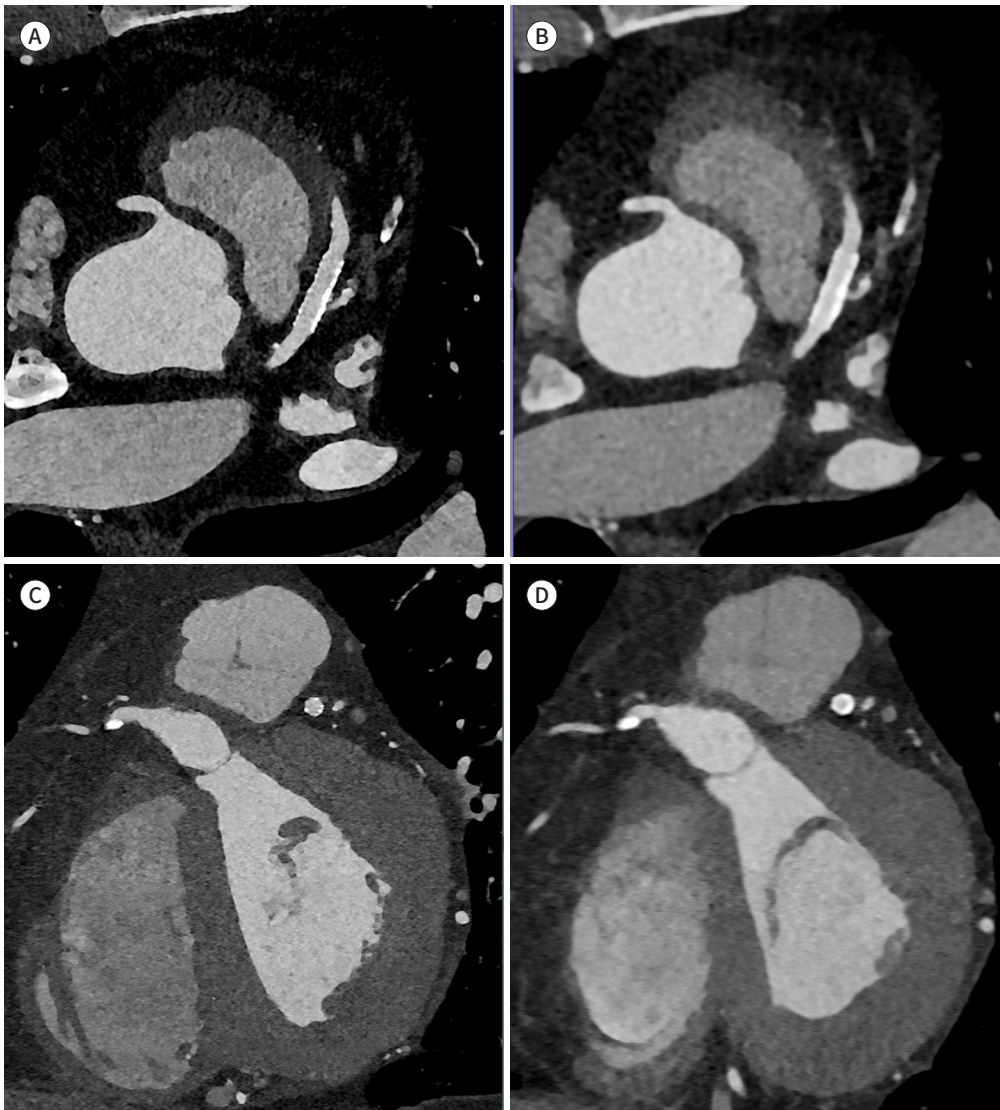
A 76-year-old male patient underwent a 6-year follow-up coronary CT angiography after the stenting of his right coronary artery. The curved multi-planar reconstruction image, using super-resolution deep-learning reconstruction, demonstrates a clear view of the stent lumen. No discernible distinction was observed in the CT attenuation between the in-stent lumen (586 HU) and the proximal vessel outside the stent (585 HU), suggesting a negligible artificial elevation in CT attenuation attributable to beam hardening. HU = Hounsfield unit

히 기존 방식보다 3 mm 미만 스텐트의 ISR 평가 정확성을 높일 수 있었다(44, 45).

광자계수 CT (Photon Counting CT)

Photon counting CT (이하 PCT)는 기존 CT의 에너지 통합 검출기(energy integrating detector; 이하 EID)와 근본적으로 원리가 다른 광자 계수 검출기(photon counting detector; 이하 PCD)를 사용하여 선량 효율, 공간해상력 및 에너지 식별 기능을 향상시킨 차세대 CT이다. 카드뮴-아연-텔루라이드와 같은 다양한 재료로 만들어진 PCD는 광자를 직접 에너지로 변환할 수 있어

Fig. 3. Comparison of stent visualization: photon counting CT vs. 192-channel dual source CT. Coronary CT angiography of a patient with coronary artery disease and a stent in the left anterior descending artery. **A-D.** A comparison was made between a photon counting CT (**A, C**) and a 192-channel dual source CT (**B, D**). Both orthogonal axial views (**A, B**) and short-axis views (**C, D**) clearly depict the stent in the proximal left anterior descending artery. However, the stent lumen is more clearly visible using photon counting CT (**A, C**). Clinical case in courtesy of Phillip Young at Mayo Clinic.



특히 낮은 에너지 레벨에서 기존의 EID와 비교해 훨씬 정확한 감쇠 스펙트럼을 감지할 수 있다. 또한 공간해상력이 크게 개선되어 PCT는 등중심(isocenter)에서 178 μm 에 해당하는 28 line pair/cm까지 구별해낼 수 있는데(46), 이는 여전히 스텐트 스트럿보다는 두껍지만 혈관 내 초음파 촬영술(intravascular ultrasonography)의 종축 해상력(100–150 μm)과 유사한 수치이다. 다양한 생체 외 연구에서 PCT가 관상동맥 스텐트 영상의 질을 개선할 수 있음이 보고되었으며(47-49), 실제 환자를 대상으로 한 연구에서도 PCT는 기존의 CT 모델과 비교해 방사선량은 더 적으면서도 우월한 공간해상력, 연부조직 대조능을 보여주었다(Fig. 3) (50).

결론

현대의 CCTA 기술은 관상동맥 스텐트의 내강을 정확하게 평가하는데 과거보다 높은 민감도, 특이도와 음성예측도를 보이며, 공간해상력이 개선되면서 3 mm 미만의 스텐트에서 진단율도 올라가고 있다. 특히 CCTA의 뛰어난 음성예측도를 고려할 때, CCTA를 통해 ISR이 배제된 환자들은 불필요한 침습적인 혈관조영술을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 CCTA는 관상동맥에 스텐트를 삽입한 환자군에서 침습적이고 고식적인 혈관조영술로 넘어가기 전에 중요한 선별 검사로서의 역할을 할 것으로 기대한다.

Author Contributions

Conceptualization, all authors; data curation, all authors; formal analysis, L.Y.S.; investigation, P.E.; methodology, L.W.; project administration, L.W.; supervision, P.E., L.W.; validation, L.W.; visualization, L.Y.S.; writing—original draft, L.Y.S.; and writing—review & editing, all authors.

Conflicts of Interest

The authors have no potential conflicts of interest to disclose.

ORCID iDs

Yoon Seong Lee  <https://orcid.org/0000-0001-6833-6596>

Eun-Ah Park  <https://orcid.org/0000-0001-6203-1070>

Whal Lee  <https://orcid.org/0000-0003-1285-5033>

Funding

None

REFERENCES

1. Serruys PW, de Jaegere P, Kiemeneij F, Macaya C, Rutsch W, Heyndrickx G, et al. A comparison of balloon-expandable-stent implantation with balloon angioplasty in patients with coronary artery disease. *N Engl J Med* 1994;331:489-495
2. Fischman DL, Leon MB, Baim DS, Schatz RA, Savage MP, Penn I, et al. A randomized comparison of coronary-stent placement and balloon angioplasty in the treatment of coronary artery disease. *N Engl J Med* 1994;331:496-501
3. Sigwart U, Puel J, Mirkovitch V, Joffe F, Kappenberger L. Intravascular stents to prevent occlusion and restenosis after transluminal angioplasty. *N Engl J Med* 1987;316:701-706
4. Shlofmitz E, Iantorno M, Waksman R. Restenosis of drug-eluting stents: a new classification system based on disease mechanism to guide treatment and state-of-the-art review. *Circ Cardiovasc Interv* 2019;12:

e007023

5. Moussa ID, Mohanane D, Saucedo J, Stone GW, Yeh RW, Kennedy KF, et al. Trends and outcomes of restenosis after coronary stent implantation in the United States. *J Am Coll Cardiol* 2020;76:1521-1531
6. Zellweger MJ, Weinbacher M, Zutter AW, Jeger RV, Mueller-Brand J, Kaiser C, et al. Long-term outcome of patients with silent versus symptomatic ischemia six months after percutaneous coronary intervention and stenting. *J Am Coll Cardiol* 2003;42:33-40
7. Piccolo R, Stefanini GG, Franzone A, Spitzer E, Blöchlinger S, Heg D, et al. Safety and efficacy of resolute zotarolimus-eluting stents compared with everolimus-eluting stents: a meta-analysis. *Circ Cardiovasc Interv* 2015;8:e002223
8. Knuuti J, Wijns W, Saraste A, Capodanno D, Barbato E, Funck-Brentano C, et al. 2019 ESC guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes. *Eur Heart J* 2020;41:407-477
9. Pack JD, Xu M, Wang G, Baskaran L, Min J, De Man B. Cardiac CT blooming artifacts: clinical significance, root causes and potential solutions. *Vis Comput Ind Biomed Art* 2022;5:29
10. Pugliese F, Weustink AC, Van Mieghem C, Alberghina F, Otsuka M, Meijboom WB, et al. Dual source coronary computed tomography angiography for detecting in-stent restenosis. *Heart* 2008;94:848-854
11. Pflederer T, Marwan M, Renz A, Bachmann S, Ropers D, Kuettner A, et al. Noninvasive assessment of coronary in-stent restenosis by dual-source computed tomography. *Am J Cardiol* 2009;103:812-817
12. Schuijf JD, Pundziute G, Jukema JW, Lamb HJ, Tuinenburg JC, van der Hoeven BL, et al. Evaluation of patients with previous coronary stent implantation with 64-section CT. *Radiology* 2007;245:416-423
13. Zhao J, Zheng LL, Yang Y. Evaluation of coronary artery in-stent patency using 64-slice computed tomography. *Coron Artery Dis* 2011;22:540-552
14. Andreini D, Pontone G, Bartorelli AL, Trabattini D, Mushtaq S, Bertella E, et al. Comparison of feasibility and diagnostic accuracy of 64-slice multidetector computed tomographic coronary angiography versus invasive coronary angiography versus intravascular ultrasound for evaluation of in-stent restenosis. *Am J Cardiol* 2009;103:1349-1358
15. Maintz D, Burg MC, Seifarth H, Bunck AC, Ozgün M, Fischbach R, et al. Update on multidetector coronary CT angiography of coronary stents: in vitro evaluation of 29 different stent types with dual-source CT. *Eur Radiol* 2009;19:42-49
16. Groen JM, Greuter MJ, van Ooijen PM, Willems TP, Oudkerk M. Initial results on visualization of coronary artery stents at multiple heart rates on a moving heart phantom using 64-MDCT. *J Comput Assist Tomogr* 2006;30:812-817
17. Groen JM, Greuter MJ, van Ooijen PM, Oudkerk M. A new approach to the assessment of lumen visibility of coronary artery stent at various heart rates using 64-slice MDCT. *Eur Radiol* 2007;17:1879-1884
18. Becker CR, Hong C, Knez A, Leber A, Bruening R, Schoepf UJ, et al. Optimal contrast application for cardiac 4-detector-row computed tomography. *Invest Radiol* 2003;38:690-694
19. Cademartiri F, Maffei E, Palumbo AA, Malagò R, La Grutta L, Meijboom WB, et al. Influence of intra-coronary enhancement on diagnostic accuracy with 64-slice CT coronary angiography. *Eur Radiol* 2008;18:576-583
20. Cademartiri F, Mollet NR, Lemos PA, Saia F, Midiri M, de Feyter PJ, et al. Higher intracoronary attenuation improves diagnostic accuracy in MDCT coronary angiography. *AJR Am J Roentgenol* 2006;187:W430-W433
21. Andreini D, Pontone G, Mushtaq S, Bartorelli AL, Conte E, Bertella E, et al. Coronary stent evaluation with coronary computed tomographic angiography: comparison between low-osmolar, high-iodine concentration iomeprol-400 and iso-osmolar, lower-iodine concentration iodixanol-320. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2014;8:44-51
22. Seifarth H, Ozgün M, Raupach R, Flohr T, Heindel W, Fischbach R, et al. 64- Versus 16-slice CT angiography for coronary artery stent assessment: in vitro experience. *Invest Radiol* 2006;41:22-27
23. Mahnken AH, Mühlenbruch G, Seyfarth T, Flohr T, Stanzel S, Wildberger JE, et al. 64-slice computed tomography assessment of coronary artery stents: a phantom study. *Acta Radiol* 2006;47:36-42
24. Soon KH, Cox N, Chaitowitz I, Selvanayagam JB, Farouque O, MacGregor L, et al. Non-invasive computed tomography angiography in the assessment of coronary stent patency: an Australian experience. *Intern Med J* 2007;37:360-364
25. Tedeschi C, Ratti G, De Rosa R, Sacco M, Borrelli F, Tammaro P, et al. Usefulness of multislice computed tomography to assess patency of coronary artery stents versus conventional coronary angiography. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)* 2008;9:485-492

26. Oncel D, Oncel G, Tastan A, Tamci B. Evaluation of coronary stent patency and in-stent restenosis with dual-source CT coronary angiography without heart rate control. *AJR Am J Roentgenol* 2008;191:56-63
27. Yamaoka O, Ikeno K, Fujioka H, Kinoshita M, Murata K, Morita R, et al. Detection of Palmaz-Schatz stent by ultrafast CT. *J Comput Assist Tomogr* 1995;19:128-130
28. Ohnuki K, Yoshida S, Ohta M, Shimizu M, Mochizuki S, Nishioka M, et al. New diagnostic technique in multi-slice computed tomography for in-stent restenosis: pixel count method. *Int J Cardiol* 2006;108:251-258
29. Kitagawa T, Yamamoto H, Horiguchi J, Hirai N, Fujii T, Ito K, et al. Usefulness of measuring coronary lumen density with multi-slice computed tomography to detect in-stent restenosis. *Int J Cardiol* 2008;124:239-243
30. Seifarth H, Raupach R, Schaller S, Fallenberg EM, Flohr T, Heindel W, et al. Assessment of coronary artery stents using 16-slice MDCT angiography: evaluation of a dedicated reconstruction kernel and a noise reduction filter. *Eur Radiol* 2005;15:721-726
31. Leipsic J, Heilbron BG, Hague C. Iterative reconstruction for coronary CT angiography: finding its way. *Int J Cardiovasc Imaging* 2012;28:613-620
32. Moscariello A, Takx RA, Schoepf UJ, Renker M, Zwerner PL, O'Brien TX, et al. Coronary CT angiography: image quality, diagnostic accuracy, and potential for radiation dose reduction using a novel iterative image reconstruction technique-comparison with traditional filtered back projection. *Eur Radiol* 2011;21:2130-2138
33. Renker M, Ramachandra A, Schoepf UJ, Raupach R, Apfaltrier P, Rowe GW, et al. Iterative image reconstruction techniques: applications for cardiac CT. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2011;5:225-230
34. Lee E, Kim YK, Chun EJ, Choi SI. Coronary stent on coronary CT angiography: assessment with model-based iterative reconstruction technique. *J Korean Soc Radiol* 2016;74:291-298
35. Yang J, Yang X, De Cecco CN, Duguay TM, Chen Z, Tesche C, et al. Iterative reconstruction improves detection of in-stent restenosis by high-pitch dual-source coronary CT angiography. *Sci Rep* 2017;7:6956
36. Bamberg F, Dierks A, Nikolaou K, Reiser MF, Becker CR, Johnson TR. Metal artifact reduction by dual energy computed tomography using monoenergetic extrapolation. *Eur Radiol* 2011;21:1424-1429
37. Liu Q, Wang Y, Qi H, Yu Y, Xing Y. Exploring the best monochromatic energy level in dual energy spectral imaging for coronary stents after percutaneous coronary intervention. *Sci Rep* 2021;11:17576
38. Andreini D, Collet C, Leipsic J, Nieman K, Bittencourt M, De Mey J, et al. Pre-procedural planning of coronary revascularization by cardiac computed tomography: an expert consensus document of the Society of Cardiovascular Computed Tomography. *EuroIntervention* 2022;18:e872-e887
39. Andreini D, Mushtaq S, Pontone G, Rogers C, Pepi M, Bartorelli AL. Severe in-stent restenosis missed by coronary CT angiography and accurately detected with FFR_{CT}. *Int J Cardiovasc Imaging* 2017;33:119-120
40. Andreini D, Mushtaq S, Pontone G, Conte E, Collet C, Sonck J, et al. CT perfusion versus coronary CT angiography in patients with suspected in-stent restenosis or CAD progression. *JACC Cardiovasc Imaging* 2020;13:732-742
41. Mushtaq S, Pontone G, Conte E, Trabattoni D, Galli S, Gili S, et al. Diagnostic accuracy of subendocardial vs. transmural myocardial perfusion defect for the detection of in-stent restenosis or progression of coronary artery disease after percutaneous coronary intervention. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2023;17:277-280
42. Tatsugami F, Higaki T, Nakamura Y, Yu Z, Zhou J, Lu Y, et al. Deep learning-based image restoration algorithm for coronary CT angiography. *Eur Radiol* 2019;29:5322-5329
43. Lee TC, Zhou J, Yu Z, Cai L. Deep learning enabled wide-coverage high-resolution cardiac CT. Available at: <https://doi.org/10.1117/12.2611817>. Published 2022. Accessed January 12, 2024
44. Nagayama Y, Emoto T, Hayashi H, Kidoh M, Oda S, Nakaura T, et al. Coronary stent evaluation by CTA: image quality comparison between super-resolution deep learning reconstruction and other reconstruction algorithms. *AJR Am J Roentgenol* 2023;221:599-610
45. Kawai H, Motoyama S, Sarai M, Sato Y, Matsuyama T, Matsumoto R, et al. Coronary computed tomography angiographic detection of in-stent restenosis via deep learning reconstruction: a feasibility study. *Eur Radiol* 2024;34:2647-2657
46. Si-Mohamed S, Boccalini S, Rodesch PA, Dessouky R, Lahoud E, Broussaud T, et al. Feasibility of lung imaging with a large field-of-view spectral photon-counting CT system. *Diagn Interv Imaging* 2021;102:305-312
47. Stein T, Taron J, Verloh N, Doppler M, Rau A, Hagar MT, et al. Photon-counting computed tomography of coronary and peripheral artery stents: a phantom study. *Sci Rep* 2023;13:14806
48. Mannil M, Hickethier T, von Spiczak J, Baer M, Henning A, Hertel M, et al. Photon-counting CT: high-resolution imaging of coronary stents. *Invest Radiol* 2018;53:143-149

49. Bratke G, Hickehier T, Bar-Ness D, Bunck AC, Maintz D, Pahn G, et al. Spectral photon-counting computed tomography for coronary stent imaging: evaluation of the potential clinical impact for the delineation of in-stent restenosis. *Invest Radiol* 2020;55:61-67
50. Si-Mohamed SA, Boccalini S, Lacombe H, Diaw A, Varasteh M, Rodesch PA, et al. Coronary CT angiography with photon-counting CT: first-in-human results. *Radiology* 2022;303:303-313
51. de Graaf FR, Schuijf JD, van Velzen JE, Boogers MJ, Kroft LJ, de Roos A, et al. Diagnostic accuracy of 320-row multidetector computed tomography coronary angiography to noninvasively assess in-stent restenosis. *Invest Radiol* 2010;45:331-340
52. Veselka J, Cadova P, Tomasov P, Theodor A, Zemanek D. Dual-source CT angiography for detection and quantification of in-stent restenosis in the left main coronary artery: comparison with intracoronary ultrasound and coronary angiography. *J Invasive Cardiol* 2011;23:460-464
53. Zhang XH, Yang L, Wu J, Ju HY, Zhang F, He B, et al. Diagnostic accuracy and its affecting factors of dual-source CT for assessment of coronary stents patency and in-stent restenosis. *Chin Med J (Engl)* 2012;125:1936-1940
54. Yoshimura M, Nao T, Miura T, Okada M, Nakashima Y, Fujimura T, et al. New quantitative method to diagnose coronary in-stent restenosis by 64-multislice computed tomography. *J Cardiol* 2015;65:57-62
55. Tatsugami F, Higaki T, Sakane H, Nakamura Y, Iida M, Baba Y, et al. Diagnostic accuracy of in-stent restenosis using model-based iterative reconstruction at coronary CT angiography: initial experience. *Br J Radiol* 2018;91:20170598
56. Li Y, Yu M, Li W, Lu Z, Wei M, Zhang J. Third generation dual-source CT enables accurate diagnosis of coronary restenosis in all size stents with low radiation dose and preserved image quality. *Eur Radiol* 2018;28:2647-2654
57. Li J, Guo MT, Yang X, Gao F, Li N, Huang MG. The usefulness of subtraction coronary computed tomography angiography for in-stent restenosis assessment of patients with CoCr stent using 320-row area detector CT. *Medicine (Baltimore)* 2021;100:e28345

관상동맥 CT 조영술을 활용한 스텐트 재협착 평가: 과거와 현재 최신 동향으로의 여정

이윤성^{1,2} · 박은아^{1,2} · 이 활^{1,2*}

관상동맥병 환자의 치료에 풍선팽창스텐트 치료는 현재 가장 흔히 시행되는 관상동맥재개통 치료법이다. 그러나 경피적 관상동맥 중재술 이후 재협착은 여전히 주요 합병증으로 남아 있다. 스텐트 재협착을 진단하기 위한 도구로서 관상동맥 CT 조영술(coronary CT angiography; 이하 CCTA)은 과거에는 주로 번짐허상과 움직임허상으로 인해 내강을 정확히 판단하기 어려워 그 역할이 제한적이었다. 따라서 정확한 확인을 위해서 침습적인 고식적 관상동맥 조영술로 넘어가는 경우가 많았다. 그러나 근래 CT 기술의 발달로 민감도와 특이도가 모두 개선되면서 그 역할이 중요해지고 있으며, 특히 일관되게 음성예측도가 높게 보고되고 있다. 본 종설에서는 CCTA를 이용한 관상동맥 스텐트 재협착 진단의 과거와 현재, 그리고 최신 동향에 대해 알아보려고 한다.

¹서울대학교병원 영상의학과,

²서울대학교 의과대학 영상의학교실